

2. B. Song, S. Dong, B. Zhang, et al., Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V[J], Mater. Des. 35 (2012) 120–125.
3. D. Dai, D. Gu, Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper-matrix composites: simulation and experiments[J], Mater. Des. 55 (2014) 482–491.
4. A. Simchi, Direct laser sintering of metal powders: mechanism, kinetics and microstructural features[J], Mater. Sci. Eng. A 428 (1) (2006) 148–158.
5. S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, et al., On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: fatigue resistance and crack growth performance[J], Int. J. Fatigue 48 (2013) 300–307.
6. Y. Liu, Y. Yang, S. Mai, et al., Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316 L stainless steel powder[J], Mater. Des. 87 (2015) 797–806.
7. S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, et al., Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones [J], Acta Mater. 108 (2016) 36–45.

ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ФРЕЗАМИ С ВОЛНООБРАЗНЫМИ ЛЕЗВИЯМИ

Г.И.Коровин¹, С. И. Петрушин², д.т.н., проф., Р.Х. Губайдулина², к.т.н., доц.

¹Промышленная компания МИОН,

634034, г. Томск, ул. Вершинина 46/6, Тел: (3822) 99-65-01; 21-30-37

*²Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета*

652050, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (8384-51)7-77-61

E-mail: korovin9@yandex.ru, victory_28@mail.ru.

В работе показано, что обработка титановых сплавов представляет собой наиболее сложную задачу в обработке металлов резанием. Ведущие фирмы мира занимаются этой проблемой, так как титановые сплавы являются основой авиакосмической промышленности. В работе исследованы быстрорежущие фрезы для обработки титановых сплавов, имеющие волнообразную режущую кромку на зубе. Следующий зуб фрезы сдвинут на полшага. Это приводит к уменьшению силовой нагрузки наклепа обработанной поверхности. Предложена аналитическая методика анализа подобных фрез. Установлено на основе проведения силовых и стойкостных исследований волновых фрез их преимущество по сравнению со стандартными, а именно, они имеют меньшую удельную силовую нагрузку, большую стойкость и меньший наклеп поверхностного слоя.

Титановые сплавы, наряду с высокой прочностью и низким удельным весом, обладают значительно пониженной обрабатываемостью резанием [1]. Основная причина низкой обрабатываемости связана с упрочнением (наклёпом) поверхностного слоя в процессе резания [2], когда лезвие инструмента срезает стружку не с основного металла, а с уже упрочнённой предыдущими лезвиями поверхности. Особенно это актуально для зубьев фрез, которые начинают резать с нулевой толщины срезаемого слоя [3].

В настоящее время содержание титановых сплавов в конструкциях современной авиации составляет около 15% [4]. При этом большая часть изделий обладает сложной пространственной формой, имеет множество карманов и тонких стенок, например, стойки шасси самолетов. В результате при обработке резанием в стружку может уходить до 90% обрабатываемого металла, а операции чернового и чистового фрезерования занимают 60-80 % от всей трудоемкости механической обработки. Коэффициент относительной обрабатываемости по отношению к стали 45 в зависимости от марки титанового сплава составляет 0,2 – 0,45. Поэтому, совершенствование режущего инструмента для обработки титановых сплавов представляет собой актуальную задачу.

Наиболее крупными производителями, специализирующихся на производстве фрез для обработки титановых сплавов, являются следующие компании: Minicut International Inc. (Канада), Hanita metal works (Израиль), Melin Tool Company (США), Dauphin Precision Tool (США), ООО «ПК МИОН» (Россия) и др. Так фрезы LIST M фирмы Minicut, предназначенные для черновой обработки титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов, имеют заднюю поверхность с выкружками, чередующимися в шахматном порядке от зуба к зубу, что обеспечивает деление срезаемого

го слоя и эффективное дробление стружки, а также способствует повышению производительности [5]. Зубья фрез серии Crest-Kut типа KPSC и KPAC фирмы Weldon (США), предназначенных для черновой и чистовой обработки авиационных материалов, выполнены таким образом, что развертка режущей кромки является синусоидой, которая способствует удалению стружки из зоны резания и повышению качества обработанной поверхности [6]. Аналогичную конструкцию имеют фрезы серии Aero-Cut типа CCAC4 и CCAC6 фирмы Melin [7]. Фрезы серии WavCut фирмы Hanita (Израиль) предназначены для обработки титановых сплавов и нержавеющей сталей, в том числе при большой ширине фрезерования, имеют переменный угол наклона стружечных канавок, за счет чего обеспечивается повышение производительности и улучшается отвод стружки из зоны резания [8]. В основном эти фрезы выполняются из быстрорежущих сталей и цельными. Существуют конструкции концевых фрез с механическим креплением многогранных пластин, но они сложны в изготовлении и вследствие больших диаметров являются не универсальными в применении.

Концевые фрезы, выпускаемые ООО «ПК МИОН» для обработки титановых сплавов, имеют волнообразную режущую кромку и переменный угол наклона стружечных канавок (рис. 1).

Данная фреза имеет следующие конструктивные особенности:

1. Режущая кромка каждого зуба находится на цилиндрической образующей фрезы, что позволяет применять ее для чистового фрезерования.
2. В отличие от известных конструкций волна каждого последующего зуба сдвинута вдоль оси по отношению к предыдущей волне на определенную величину.
3. За счет специальной заточки передний угол на зубе имеет примерно постоянную величину

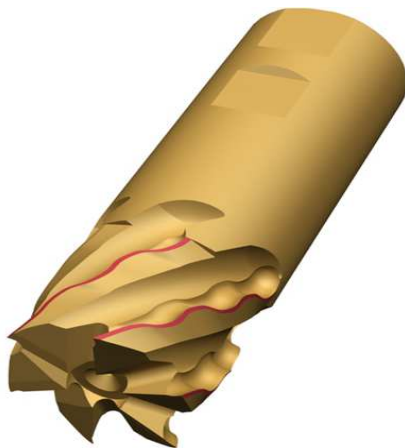


Рис.1. Внешний вид волнообразной фрезы
ООО «ПК МИОН».

Результаты исследований

Отличие концевой фрезы с волнообразными режущими кромками от стандартной состоит в том, что на цилиндрической части углы режущего клина в каждой точке кромки имеют различные значения в связи с переменностью угла наклона лезвия λ .

Рассмотрим задачу расчета главного заднего угла лезвия в произвольной точке А. Исходными данными для этого анализа являются (рис.2.):

Угол наклона волны – ω ; угол наклона волнообразной кромки в точке А – λ_e^A ; главный передний угол в нормальном сечении фрезы – γ_N ; задний угол в осевом сечении фрезы – α_0

Необходимо определить:

Угол наклона режущей кромки в точке А в статической системе координат(1) – λ_c^A ; главный задний угол в точке А в статической системе координат – α_N^A .

Сдвиг волн зубьев позволяет изменить схему срезания припуска под обработку. Каждый участок последующего зуба срезает стружку в другом направлении по сравнению с предыдущим и лезвие идет в менее наклонном направлении, что приводит к снижению удельной нагрузки на единицу длины режущей кромки. Такое уменьшение нагрузки должно приводить к уменьшению наклепа обработанной поверхности титанового сплава и к повышению стойкости фрезы.

Подобное «разноугольное» резание наибольший положительный эффект будет иметь при величине сдвига, равном половине волны, когда каждые два смежных зуба имеют максимально разный угол наклона режущей кромки.

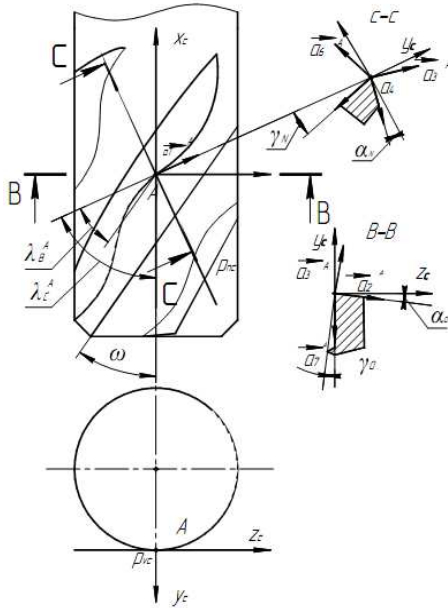


Рис.2. Схема к волновой анализу геометрии фрезы.

На рис.2 показана режущая часть концевой фрезы с волнообразными кромками. Статическая система координат в точке А $x_c y_c z_c$ согласно определения [9] задана таким образом, что ось x направлена вдоль оси фрезы, ось y - по радиусу фрезы, а ось z - касательно к окружности. Эти оси образуют правую систему координат. Через точку А проведена также статическая основная плоскость P_{vc} , перпендикулярная к вектору скорости резания, статическая плоскость резания P_{tc} , касательная к режущей кромке и статическая главная секущая плоскость P_{nc} , перпендикулярная к P_{vc} и P_{tc} .

Из искомых геометрических параметров угол наклона режущей кромки в точке А определится суммой:

$$\lambda_c^A = \omega \pm \lambda_b^A \quad (1)$$

В построенных координатах единичный направляющий вектор режущей кромки в точке А будет равен:

$$\bar{a}_1^A = \cos \lambda_c^A \cdot \bar{i}_c + \sin \lambda_c^A \cdot \bar{k}_c \quad (2)$$

Единичный направляющий вектор касательный к задней поверхности фрезы в сечении В-В имеет следующий вид (см. рис.1):

$$\bar{a}_2^A = -\sin \alpha_0 \cdot \bar{j}_c + \cos \alpha_0 \bar{k}_c \quad (3)$$

Тогда нормаль к задней поверхности \bar{a}_3^A определится векторным произведением:

$$\begin{aligned} \bar{a}_3^A &= \bar{a}_2^A \times \bar{a}_1^A = \begin{pmatrix} i_c & \bar{j}_c & \bar{k}_c \\ 0 & -\sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 \\ \cos \lambda_c^A & 0 & \sin \lambda_c^A \end{pmatrix} = \\ &= (-\sin \alpha_0 \cdot \sin \lambda_c^A \cdot \bar{i}_c + \cos \alpha_0 \cdot \cos \lambda_c^A \cdot \bar{j}_c + \\ &+ \sin \alpha_0 \cdot \cos \lambda_c^A \cdot \bar{k}_c) \times \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \lambda_c^A} \end{aligned} \quad (4)$$

При $\lambda_c^\phi = 0$ (касательная к режущей кромке в точке А параллельна оси фрезы) выражение (4) примет вид:

$$\bar{a}_3^A = \cos \alpha_0 \cdot \bar{j}_c + \sin \alpha_0 \cdot \bar{k}_c \quad (5)$$

Из выражения (4) следует, что искомый главный задний угол в точке А будет равен:

$$\cos \alpha_N^A = \cos \alpha_0 \cdot \cos \lambda_c^N \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_0 \cdot \sin^2 \lambda_c^A} \quad (6)$$

Расчеты по формуле (6) показывают, что с увеличением угла кромки задний угол уменьшается, что может привести к резкому износу задней поверхности. Эти данные можно использовать при конструировании волновых фрез.

Для проведения экспериментов [10] были изготовлены концевые фрезы диаметром Ø20мм по ГОСТ 23248-78 и фрезы с волнообразной режущей кромкой из быстрорежущей стали марки Р6М5К5. При этом для фрез с волнообразными лезвиями была разработана специальная технология заточки, обеспечивающая расположение зубьев по цилиндру.

На рисунке 3 приведены силовые зависимости при обработке титанового сплава ОТ4 на обрабатывающем центре DMU-50 с постоянными параметрами режима резания: скорость резания $V = 100$ м/мин; подача на зуб $S_z = 0,08$ мм/зуб; ширина фрезерования $B = 24$ мм.

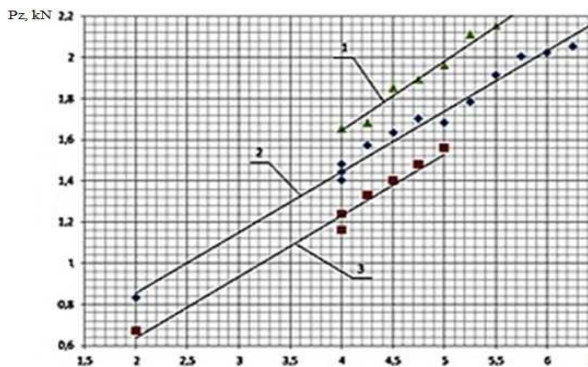


Рис.3. Зависимость составляющей силы резания (P_z) от глубины фрезерования (t)

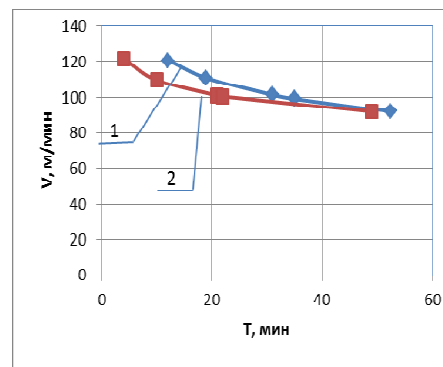


Рис.4. Стойкостные зависимости: 1- волновая фреза; 2 – фреза с $\gamma = 15^\circ$

Испытывались три концевые фрезы: 1- фреза с числом зубьев $z=4$ и передним углом $\gamma=15^\circ$; 2- волновая фреза с $z=4$ и $\gamma=15^\circ$ и 3- фреза с $z=3$ по ГОСТ 23248-78. Эксперименты по определению силы резания (см. рис. 3) производились с помощью динамометра Kistler-9257BA. При этом в зависимости от времени резания брались максимальные значения касательной составляющей силы P_z [11,12].

Из рисунка 3 следует, что волновая фреза дает меньшую силу резания, чем фреза (1), но большую на 15%, чем фреза (3). В то же время эти фрезы имеют различные длины одновременно режущих кромок. Если перейти к удельным показателям, то величина составляющей силы резания P_z , приходящаяся на 1мм длины режущей кромки у фрезы по ГОСТ (3) выше, чем у волновой фрезы (2) на 17%, а у фрезы с увеличенным передним углом $\gamma = +15^\circ$ (1) больше на 16%, чем у волновой фрезы. Таким образом, волновая фреза оказывает наименьшее силовое воздействие на срезаемый слой.

Сравнительные стойкостные испытания (рис.4) проводились при фрезеровании со смазочно-охлаждающей жидкостью заготовок концевыми фрезами из быстрорежущей стали Р6М5К5 с износостойким покрытием на основе ZrN, конструкции фирмы МИОН Т710 и концевая фреза ТК562W20 с износостойким покрытием на основе ZrN. В данном эксперименте использовали схему попутного фрезерования со следующими параметрами: глубина резания $t = 3$ мм; ширина фрезерования $B = 24$ мм; подача на зуб $S_z = 0,08$ мм/зуб. Установлено, что стойкость волновых фрез выше во всем диапазоне скоростей резания. По результатам этих испытаний выведены следующие эмпирические уравнения (7) и (8) для волновой фрезы и для фрезы с $\gamma = +15^\circ$:

$$V_1 = \frac{141.7}{T^{0.111}} \text{ - фреза ТК562} \quad (7)$$

$$V_2 = \frac{190.8}{T^{0.184}} \text{ - волновая Т710} \quad (8)$$

При подаче на зуб $S_z \leq 0,08$ мм стружка становится легче водной охлаждающей жидкости и всплывает, при этом затягивается в зону резания. При подаче на зуб $S_z \geq 0,16$ мм при износе фрезы по задней грани $f_{изн.} > 0,15$ мм стружколомание по ширине прекращалось. При подаче на зуб $S_z = 0,1-0,12$ мм наблюдалось эффективное стружколомание по ширине на всем протяжении работы фрезы (12,5 часов) до фаски износа по задней грани 0,4мм, что отражено в акте испытаний на Верхне-Салдинском Металлургическом Производственном Объединении. Данная операция фрезерования проводилась для изготовления стойки шасси для самолёта «Boeing-787».

Волнообразные фрезы со сдвинутыми вдоль оси зубьями реализуют схему срезания стружки, при которой каждый участок данного лезвия снимает стружку в направлении, отличающемся от направления на предыдущем лезвии, что меняет все показатели процесса.

Экспериментально показано, что фрезы с волновыми зубьями по сравнению со стандартными фрезами для обработки титановых сплавов дают меньшую удельную силовую нагрузку, большую стойкость и меньший наклеп поверхностного слоя.

Волновые фрезы способствуют эффективному ломанию стружки по ширине срезаемого слоя, что значительно облегчает ее дальнейшую переработку.

Список литературы

1. Кривоухов В. А. Обработка резанием титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 180 с.
2. Петруха П. Г. Резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
3. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.
4. Emmanuel O/ Ezugwu, Rosenmar Batista Da Silva, Wisley Falco Sales. Overview of the Machining of Titanium Alloys. Encyclopedia of Sustainable Technologies. 2017. Pp.487-506
5. Каталог режущего инструмента URL:[http:// www. minicut.com/wp-content/uploads/catalogues/catch_the_wave_titanium.pdf](http://www.minicut.com/wp-content/uploads/catalogues/catch_the_wave_titanium.pdf).
6. Каталог режущего инструмента
7. URL: [https:// www. heritagecutter.com/BrubakerWeldon/PublicStore/catalog/M42-Multi-Flute-CC,228.aspx](https://www.heritagecutter.com/BrubakerWeldon/PublicStore/catalog/M42-Multi-Flute-CC,228.aspx).
8. Каталог режущего инструмента URL:<http://www.endmill.com/pages/software.html>.
9. Каталог режущего инструмента URL:https://www.widia.com/content/dam/kennametal/widia/common/resources/downloads/literature/WIDIA%20Catalogs/Hanita-Rubig_A-09-02077EN_mm.pdf.
10. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Схема образования стружки при несвободном резании // Станки и инструменты. №2, 2018. С.35-40.
11. Коровин Г.И., Филиппов А.В., Проскоков А.В., Горбатенко В.В. Влияние геометрических параметров режущего лезвия на формирование области пластической деформации при резании титанового сплава ОТ-4.// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроения.- 2016.-№17. с.56-64.
12. Cotterell I M., Byrne G. Characterisation of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V. CIRP. Journal Manufacturing. Science. Technology, 1 (2008), pp. 81–85.
13. Abdulhakim Ali Sultan, A. Chukwujekwu Okafor. Effects of geometric parameters of wavy-edge bull-nose helic on cutting force prediction in end-milling of Inconel end-mill under MQL cooling strategy718. Journal of Manufacturing Processes 23 (2016) 102-114

ОСОБЕННОСТИ АДГЕЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

И.С. Ардашева¹, студент, П.О. Куминов¹, студент, И.М. Гончаренко^{1,2}, к.т.н., доц.

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

634050, г. Томск, пр. Ленина 30, тел. (3822)-70-16-19

²*Институт сильноточной электроники СО РАН*

634055, г. Томск, пр.-т Академический, 2/3, тел. (3822)-49-13-00

E-mail: inkar_love.ms.22@mail.ru, pavelkuminov@mail.ru

Представлены результаты исследования зависимости адгезии и твердости нанокристаллических нитридных покрытий Ti-Al-N, нанесенных на различные подложки, от величины и времени импульсного отрицательного смещения, подаваемого на обрабатываемые образцы. Проведено сопоставление регистрируемых параметров с эволюцией структуры и химического состава поверхностного слоя.

При разработке технологических процессов ионно-плазменных методов нанесения покрытий с требуемыми структурой и свойствами, необходимо учитывать влияние условий осаждения на такие основные механические характеристики материала, как твердость, модуль Юнга и адгезию системы покрытие/подложка.

Например, покрытия системы Ti-Al-N отличаются высокой стабильностью к окислению, как при обычных, так и при повышенных температурах [1, 2]. Однако, обеспечение хорошей адгезии [3] данного типа покрытия к материалам, из которых выполнены конкретные детали зависит от большого числа факторов. Как правило, материалы защитного покрытия и формообразующего субстрата различаются по структуре, кристаллохимическим, физико-механическим и теплофизическим свойствам. Вследствие чего, основной причиной снижения прочности на границе раздела и разрушения покрытий